

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Кафедра Автоматизация теплоэнергетических процессов

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Моделирование адаптивной системы нейро-нечеткого управления ветроэнергетической установкой

УДК 681.518.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Д	Закамалдин А.А.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Андык В.С.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова С.Н.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич О.А.	к.б.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Стрижак П.А.	д.ф.-м.н.		

Томск – 2016 г.

**Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы
магистра по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	Универсальные компетенции	
P1	Использовать представления о методологических основах научного познания и творчества, анализировать, синтезировать и критически оценивать знания	Требования ФГОС (ОК- 8, 9; ПК-4), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-3; ПК-8, 24), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации, осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ОК-4, 5; ПК-3, 16, 17, 25, 27, 28, 32), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах устойчивого развития.	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп.2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
	Профессиональные компетенции	
P6	Использовать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания для создания и применения инновационных технологий в теплоэнергетике	Требования ФГОС (ПК-1, 5), Критерии 5 АИОР (п.1.1), согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Применять глубокие знания в области современных технологий теплоэнергетического производства для постановки и решения задач инженерного анализа, связанных с созданием и эксплуатацией теплотехнического и теплотехнологического оборудования и установок, с использованием системного	Требования ФГОС (ПК-2, 7, 11, 18 – 20, 29, 31), Критерий 5 АИОР (пп.1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

	анализа и моделирования объектов и процессов теплоэнергетики	
P8	Разрабатывать и планировать к разработке технологические процессы, проектировать и использовать новое теплотехнологическое оборудование и теплотехнические установки, в том числе с применением компьютерных и информационных технологий	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 12 – 15, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Использовать современные достижения науки и передовой технологии в теоретических и экспериментальных научных исследованиях, интерпретировать и представлять их результаты, давать практические рекомендации по внедрению в производство	Требования ФГОС (ПК-6, 22 – 24,), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Применять методы и средства автоматизированных систем управления производства, обеспечивать его высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на теплоэнергетическом производстве, выполнять требования по защите окружающей среды	Требования ФГОС (ПК-21, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Готовность к педагогической деятельности в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ПК-32), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Кафедра Автоматизация теплоэнергетических процессов

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) _____ (Дата) Стрижак П. А.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4Д	Закамалдину Андрею Андреевичу

Тема работы:

Моделирование адаптивной системы нейро-нечеткого управления ветроэнергетической установкой	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	28.01.2016, № 488/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	17.06.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Ветроэнергетическая установка номинальной мощностью 1,5 МВт с асинхронным генератором двойного питания моделируется в режиме работы параллельно с сетью. При разработке системы управления ВЭУ на основе нейро-нечеткого контроллера, в качестве образца для сравнения используется классическая система управления ВЭУ.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none">1) Обзор существующих систем управления ветроэнергетической установкой.2) Математическая модель объекта управления.3) Моделирование классической системы управления ВЭУ и анализ полученных результатов.4) Нейро-сетевые технологии и нечеткие множества в задачах управления.5) Синтез системы управления ВЭУ на основе нейро-сетевых технологий и нечетких множеств.6) Моделирование и анализ полученной

	<p>системы управления ВЭУ.</p> <p>7) Техническое обеспечение системы управления</p> <p>8) Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.</p> <p>9) Социальная ответственность</p>
Перечень графического материала	<p>1) Постановка задачи.</p> <p>2) Структурные схемы разработанных систем управления.</p> <p>3) Копии экранов результатов моделирования.</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работ

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережении	Попова Светлана Николаевна, к.э.н., доцент
Социальная ответственность	Антоневич Ольга Алексеевна, к.б.н., доцент

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Обзор существующих систем управления ветроэнергетической установкой

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. АТП	Андык Владимир Сергеевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Д	Закамалдин Андрей Андреевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 140 с., 59 рис., 22 табл., 64 источника, 1 прил.

Ключевые слова: нейро-нечеткий контроллер, ветроэнергетическая установка, адаптивная нейро-нечеткая система управления, моделирование, генератор двойного питания, нечеткая логика, нейронные сети.

Цель работы – оценка эффективности повышения режимной управляемости ВЭУ путем применения интеллектуальной системы управления ВЭУ на основе адаптивного нейро-нечеткого контроллера. Ядро контроллера – гибридная система ANFIS, составленная из нейронной сети прямого распространения с нечетким логическим выводом Сугэно.

Все модели в процессе исследования были построены в программном пакете Simulink среды MATLAB. В результате моделирования получены зависимости основных характеристик ВЭУ с классической системой управления и ВЭУ с разработанной нейро-нечеткой системой управления, а также проведен сравнительный анализ показателей работы ВЭУ в том и другом случае.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: горизонтально-осевая трехлопастная ветроэнергетическая установка с генератором двойного питания номинальной мощностью 1,5 МВт, рассчитана на номинальную скорость ветра – 12 м/с и стартовую скорость ветра – 4,5 м/с.

Степень внедрения: результаты предлагается использовать для разработки эффективной системы управления ВЭУ.

Область применения: ВЭУ больших и средних единичных мощностей, крупные ветряные электростанции.

Для развития методики нейро-нечеткого управления актуальны и перспективны исследования в области разработки реального промышленного образца нейро-нечеткого контроллера.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АГДП – асинхронный генератор двойного питания;
БХВ – быстроходный вал;
ВАХ – вольт-амперная характеристика;
ВЭС – ветровая электростанция;
ВЭУ – ветроэнергетическая установка;
ИНС – искусственная нейронная сеть;
ННС – нейро-нечеткая система;
о.е. (pu) – относительные единицы;
ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема;
ПЛК – программируемый логический контроллер;
ТХВ – тихоходный вал;
ANFIS – adaptive network based fuzzy inference system;
ANN – artificial neural network;
Fuzzy logic – нечеткая логика;
FIS – fuzzy inference system;
RMSE – root-mean-square deviation.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	10
1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ.....	13
1.1 Устройство и классификация ВЭУ	13
1.2 Математическая модель ветроколеса	15
1.3 Математическая модель редуктора	18
1.4 Математическая модель асинхронного генератора двойного питания.....	20
1.5 Математическая модель силового преобразователя	22
1.6 Математическая модель скорости ветра	24
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛАССИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЭУ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ	26
2.1 Моделирование ВЭУ в среде MATLAB.....	26
2.2 Анализ результатов моделирования	33
3. НЕЙРО-СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И НЕЧЕТКИЕ МНОЖЕСТВА В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ	36
3.1 Нечеткие множества. Основные положения.....	36
3.2 Нейронные сети. Основные положения	41
3.3 Применение гибридных нейро-нечетких технологий в задачах управления	45
4. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЭУ НА ОСНОВЕ НЕЙРО- СЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ	50
4.1. Постановка задачи.....	50
4.2. Описание архитектуры нейро-нечеткой системы и преимуществ ее применения.....	50
4.3. Синтез нейро-нечеткой системы управления углом атаки лопастей ветроколеса в среде MATLAB	55
4.4. Синтез нейро-нечеткой системы управления скоростью вращения ротора генератора ВЭУ в среде MATLAB.....	59

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЭУ	63
5.1 Моделирование ВЭУ с полученной системой управления в среде MATLAB.....	63
5.2 Анализ результатов моделирования.....	67
6. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	73
7. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	80
7.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности технического проекта с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	81
7.2 Планирование магистерской диссертации.....	86
7.3 Затраты на разработку технического проекта	93
8. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	99
8.1 Профессиональная социальная безопасность.....	103
8.2 Экологическая безопасность	109
8.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	111
8.4 Законодательное регулирование проектных решений.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	117
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Review of existing wind turbine control systems.....	121

Графический материал:	На отдельных листах
Постановка задачи	(демонстрационный лист)
Структурные схемы разработанных систем управления	(демонстрационный лист)
Копии экранов результатов моделирования	(демонстрационный лист)

ВВЕДЕНИЕ

Ветер – неиссякаемый источник энергии. Энергию ветра люди используют с древних времен. Раньше такая энергия превалировала и заменяла мускульную силу, поскольку освоение других видов энергии было просто невозможно.

Современная рыночная экономическая система отдает предпочтение относительно дешевым технологиям использования жидких органических топлив и природного газа. Такой подход всегда тормозил разработки альтернативных источников энергии. Благодаря техническому прогрессу и общественному развитию сейчас ветроэнергетика является перспективным и подготовленным к широкому внедрению способом получения электроэнергии.

Главным недостатком ветроэнергетики является непостоянство самого источника энергии - ветра. Колебания его скорости непредсказуемы и носят вероятностный характер. Активность ветра может меняться мгновенно за очень малые временные промежутки. Поэтому в конструкциях ветроэнергетических установок (ВЭУ) постоянно вносятся усовершенствования и новшества для максимизации и эффективности извлечения электрической энергии из энергии ветра. Огромное внимание уделяется повышению регулировочной способности ВЭУ. Над этим вопросом работал коллектив исследователей Новосибирского государственного технического университета С.Н. Удалов, В.З. Манусов, Н.В. Зубова. В том числе они рассмотрели применение ряда алгоритмов на нечеткой логике с целью извлечения максимума энергии из взаимодействия лопастей ветроколеса с ветром. Также ими были сделаны выводы об эффективности применения устройств управления потоком.

Несмотря на значительный объем уже выполненных работ и достигнутых практических результатов в этой области, имеется большой потенциал для исследований.

Новейшие технические решения не могут приносить пользу без соответствующих концепций регулирования. ВЭУ – высоко инерционная система с точки зрения управления, а чем сложнее система, тем сложнее дать точные и в то же время имеющие практическое значение суждения о ее поведении. Наличие непредсказуемого изменчивого воздействия ветра вызывает в поведении системы зашумленность и нестационарность, механизм которых описать математически затруднительно. Для синтеза классических регуляторов приходится идти на значительные упрощения для описания динамики системы.

Учитывая нелинейный характер рабочих характеристик ВЭУ, актуальными являются исследования применения систем управления с использованием теории искусственного интеллекта.

Примером такой системы является адаптивная интеллектуальная система управления на основе нейросетевых технологий и нечетких множеств, которая способна подстраиваться под изменения состояния объекта и входные возмущения.

Системы на основе нечеткой логики проявили себя при управлении сложными объектами и показали свое преимущество над традиционными способами управления. Системы с применением нейронных сетей не требуют построения базы правил и могут работать в условиях параметрической неопределенности объекта управления.

Гибридные системы управления, сочетающие указанные принципы, способны во многом удовлетворить современным требованиям к проектируемым динамическим системам, а также повысить надежность и гибкость управления.

Над исследованием теоретических и практических аспектов применения перечисленных методов работали многочисленные авторы публикаций: А.А. Володин, Ф. Палис, В.Ф. Филаретов, Ю. Цепковский, Д.А. Юхимец, А.В. Левшов, Н. N. Nwobodo, A. Abraham, Jianzhong Z, С. Омату и др.

Конкретно в области исследования ВЭУ авторы выделяют проблему применения новых концепций регулирования для уменьшения механических нагрузок и для обеспечения надёжной работы. С учетом наличия множества публикаций по применению метода интеллектуального управления в различных сферах, перспективным и актуальным будет использование подобного подхода именно в приложении для ВЭУ.

Целью магистерской диссертации является оценка эффективности повышения режимной управляемости ВЭУ путем применения интеллектуальной системы управления ВЭУ на основе адаптивного нейро-нечеткого контроллера. Ядро контроллера – гибридная система ANFIS, составленная из нейронной сети прямого распространения с нечетким логическим выводом Сугэно.

Объектом исследования является модель ветроэнергетической установки номинальной мощности 1,5 МВт, работающей параллельно с сетью.

Предмет исследования – синтез нейро-нечетких систем управления углом атаки лопастей ветроколеса и угловой скоростью вращения ротора генератора.

3 НЕЙРО-СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И НЕЧЕТКИЕ МНОЖЕСТВА В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ

3.1 Нечеткие множества. Основные положения

Теория нечетких систем берет свое начало с 1965 г., когда профессор Л. Заде опубликовал основополагающую работу по теории нечётких множеств, в которой изложил математический аппарат теории нечётких множеств.

Нечеткое множество (fuzzy set) это совокупность объектов, в которой нет ярко выраженной границы между входящими в нее объектами и объектами из других окружающих множеств. Другими словами, границы множества «нечетко определены» или «размыты».

Рассмотрим основные понятия, свойства и операции для нечетких множеств.

Авторы теории нечетких множеств определяют нечеткое множество A как:

$$A = \{x, \mu_A(x)\}, x \in X, \quad (3.1)$$

где X – совокупность объектов;

$\mu_A(x)$ – степень принадлежности x к A , $[0, 1]$;

$\mu_A: X \rightarrow M$ – отображение X в пространство принадлежности M .

Чем выше степень принадлежности, тем больше элемент из множества X соответствует нечеткому множеству A .

Функция принадлежности – функция, с помощью которой вычисляется степень принадлежности.

Лингвистическая переменная – переменная, которая определяется словами естественного языка, например, «очень холодная вода» или «высокое здание». Такая интерпретация не случайна, поскольку человеку легче воспринимать и хранить информацию именно в таком виде.

Терм-множество – множество всех возможных значений лингвистической переменной.

Терм – элемент терм-множества, который задается функцией принадлежности (например, «большой», «маленький»).

Носитель нечеткого множества – элементы, степень принадлежности которых больше нуля, $A = \{x, \mu_A(x) > 0\}$.

Ядро нечеткого множества – элементы со степенью принадлежности равной единице, $A = \{x, \mu_A(x) = 1\}$.

α -сечение нечеткого множества – элементы, которые имеют степени принадлежности большие или равные нулю, $A = \{x, 0 < \mu_A(x) < 1\}$.

В таблице 3.1 приведены наиболее распространенные параметрические функции принадлежности.

Таблица 3.1 – Параметрические функции принадлежности [7]

Наименование функции	Аналитическое выражение	Интерпретация параметров
Треугольная	$\mu(u) = \begin{cases} 0, u \leq a \text{ или } u \geq c \\ \frac{u-a}{b-a}, a < u \leq b \\ \frac{c-u}{c-b}, b < u < c \end{cases}$	(a, c) – носитель нечеткого множества, b – координата максимума
Трапецевидная	$\mu(u) = \begin{cases} 0, u \leq a \text{ или } u \geq c \\ \frac{u-a}{b-a}, a \leq u \leq b \\ 1, b \leq u \leq c \\ \frac{d-u}{d-c}, c \leq u \leq d \end{cases}$	(a, d) – носитель нечеткого множества, $[b, c]$ – ядро нечеткого множества
Гауссова	$\mu(u) = \exp\left(-\frac{(u-b)^2}{2c^2}\right)$	b – координата максимума c – коэффициент концентрации
Сигмоидная	$\mu(u) = \frac{1}{1 + \exp(-a(u-c))}$	a – коэффициент крутизны c – координата перехода через 0,5

Операции с нечеткими множествами.

1) Дополнительное множество для нечеткого множества $A = \{x, \mu_A(x)\}, x \in X$, определяется как:

$$\neg A = \{x, (1 - \mu_A(x))\}, x \in X. \quad (3.2)$$

2) Пересечение И для нечетких множеств $A_1 = \{x, \mu_1(x)\}, x \in X$, и $A_2 = \{x, \mu_2(x)\}, x \in X$, определяется как:

$$A = A_1 \cap A_2 = \{x, \min(\mu_1, \mu_2)\}, x \in X. \quad (3.3)$$

3) Объединение ИЛИ для нечетких множеств $A_1 = \{x, \mu_1(x)\}, x \in X$, и $A_2 = \{x, \mu_2(x)\}, x \in X$, определяется как:

$$A = A_1 \cup A_2 = \{x, \max(\mu_1, \mu_2)\}, x \in X. \quad (3.4)$$

В общем случае, определения пересечения и объединения есть частные случаи использования Т-норм и S-конорм: \min соответствует Т-норме, а \max соответствует S-конорме [8].

Дефазификация – преобразование нечеткого множества в четкое число. Различные методы фазификации приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Методы дефазификации [7]

Метод дефазификации	Формула для нечеткого множества $A = \{u, \mu_A(u)\}, u \in [a, b]$
Центр тяжести (центроид)	$\frac{\int_a^b u \cdot \mu_A(u) du}{\int_a^b \mu_A(u) du}$
Медиана	Найти такое число c , чтобы: $\int_a^c \mu_A(u) du = \int_c^b \mu_A(u) du$
Центр максимумов	$\frac{\int_G^b u du}{\int_G^b du}, \text{ где } G = \arg \sup_{u \in [a, b]} (\mu_A(u))$
Наименьший из максимумов	$\min(G)$
Наибольший из максимумов	$\max(G)$

Нечеткий логический вывод – это представление зависимости вход-выход на основе лингвистических высказываний «Если – то» и логических операций над нечеткими множествами. Применяется при моделировании как объектов с непрерывным выходом, так и с дискретным. Типовая структура нечеткого вывода представлена на рисунке 3.1.

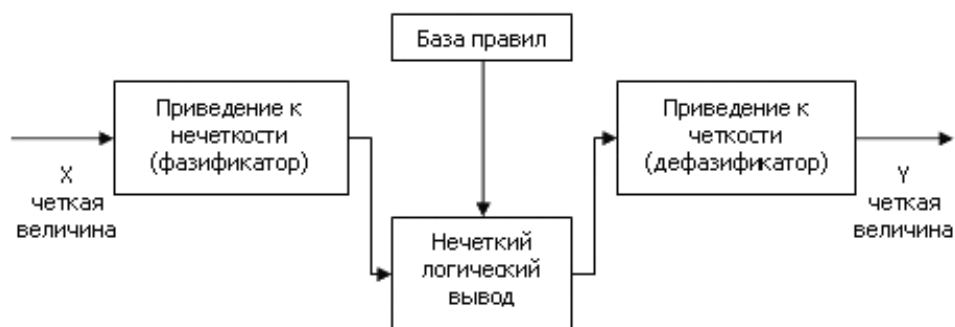


Рисунок 3.1 – Структурная схема системы нечеткого логического вывода

Нечеткая база знаний – совокупность нечетких правил «Если – то», которые отражают зависимость $Y = f(X)$. Утверждение вида «х есть высокий» является посылкой правила (антецедентом). Утверждение вида «у есть выше среднего» является заключением правила или консеквентом.

Схема нечеткого вывода вариативна в зависимости от представления нечетких понятий (функции принадлежности), вычисления логических выражений И, ИЛИ (Т-нормы, S-конормы), правил импликации. Базовые этапы нечеткого вывода:

1) Фазификация. Функции принадлежности, определенные на входных переменных x_1, x_2 применяются к их фактическим значениям x'_1, x'_2 для определения степени истинности каждой предпосылки каждого правила $A_i(x'_1), B_i(x'_2)$.

2) Логический вывод. Вычисленное значение истинности для предпосылок каждого правила R_n применяется к заключениям каждого правила R_n . Это приводит к одному нечеткому подмножеству, которое будет назначено каждой переменной вывода для каждого правила. В качестве

правил логического вывода обычно используются только операции \min (минимум) или prod (умножение).

3) Композиция. Все нечеткие подмножества, назначенные к каждой переменной вывода (во всех правилах), объединяются вместе, чтобы формировать одно нечеткое подмножество для каждой переменной вывода. Обычно используются операции \max (максимум) или sum (сумма).

4) Дефазификация (таблица 3.2).

Эти этапы являются общей схемой работы нечеткого контроллера. Всего распространено пять схем нечеткого вывода: Мамдани, Цукамото, Сугэно, Ларсена и упрощенная схема.

Рассмотри алгоритм Сугэно (Sugeno) для двух правил (рисунок 3.2):

Π_1 : если x есть A_1 и y есть B_1 , тогда $z_1 = a_1x + b_1y$,

Π_2 : если x есть A_2 и y есть B_2 , тогда $z_2 = a_2x + b_2y$.

1) Фазификация: находятся степени истинности для предпосылок каждого правила: $A_1(x_0)$, $A_2(x_0)$, $B_1(y_0)$, $B_2(y_0)$.

2) На втором этапе находятся $\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0)$, $\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$.

3) На третьем этапе определяется четкое значение переменной вывода:

$$z_1^* = a_1x_0 + b_1y_0,$$

$$z_2^* = a_2x_0 + b_2y_0.$$

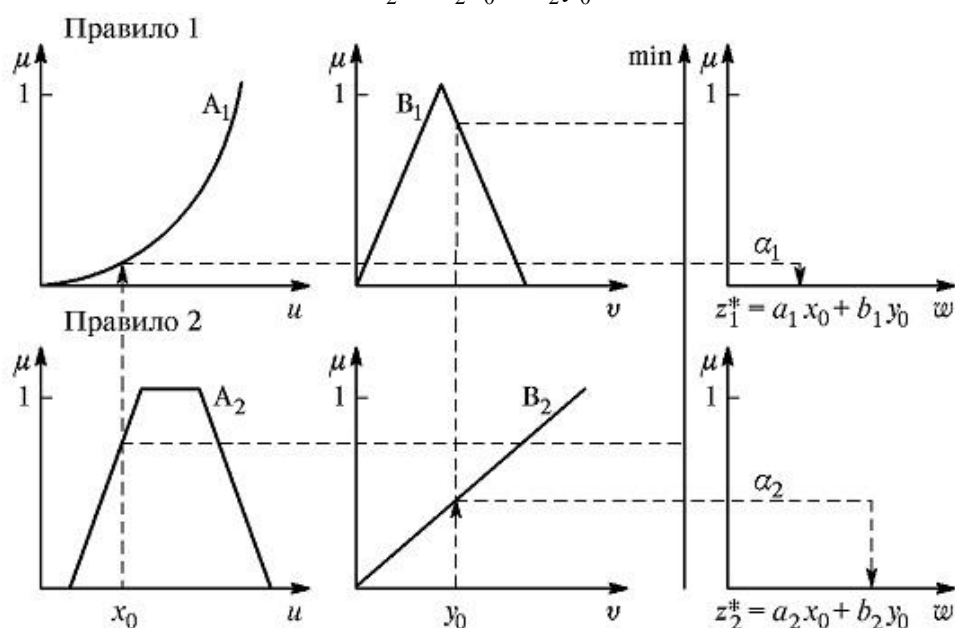


Рисунок 3.2 - Алгоритм Сугэно

3.2 Нейронные сети. Основные положения

Искусственная нейронная сеть (artificial neural network, ANN) является математической моделью биологической системы управления, которая в свою очередь состоит из миллиардов нервных клеток (нейронов). Модель сильно упрощена, но работает по принципу функционирования нервных клеток живого организма, и способна решать задачи в рамках всевозможных приложений конкурируя с классическими подходами.

Модель нейрона предложенная У. МакКалокем и У. Питтсом представлена на рисунке 3.3.

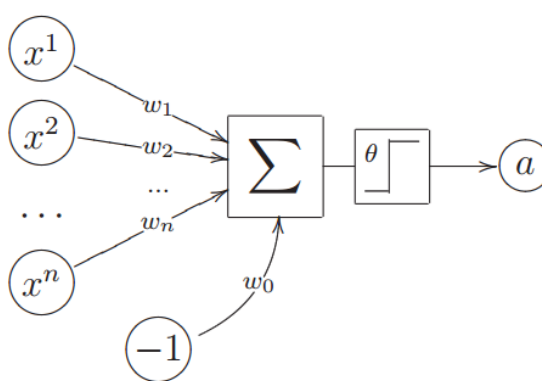


Рисунок 3.3 – Модель МакКалока-Питтса

Искусственный нейрон состоит из входов (дендритов) – n -мерный вектор $x = (x^1, \dots, x^n)$. Импульсы поступают по синапсам, каждый из которых имеет свой вес w_1, \dots, w_n , таким образом, на вход нейрона поступает произведение $x_1 w_1, \dots, x_n w_n$. В зависимости от знака веса импульс либо стремится возбудить нейрон (вес положительный), либо затормозить (вес отрицательный). В теле нейрона (соне) произведения суммируются. Когда сумма возбуждающих импульсов превысит определенный порог активации w_0 , нейрон выдает выходной сигнал 1, иначе 0. Математически это можно записать следующим образом:

$$a(x) = \varphi\left(\sum_{j=1}^n w_j x^j - w_0\right), \quad (3.5)$$

где φ – функция активации нейрона, в данном случае ступенчатая функция Хэвисайда. Выделяют около 50 различных типов нейронов, которые по-своему уникальны [9]. Так, в качестве функции активации могут выступать различные зависимости, в таблице 3.3 приведены наиболее часто использующиеся.

Таблица 3.3 – Функции активации

Название формулы	Формула
Ступенчатая функция Хэвисайда	$\theta(z) = \begin{cases} 0, & z < 0; \\ 1, & z \geq 0. \end{cases}$
Сигмоидная функция	$\sigma(z) = (1 + e^{-z})^{-1}$
Гиперболический тангенс	$th(z) = 2\sigma(2z) - 1$
Логарифмическая функция	$\ln(z + \sqrt{z^2 + 1})$
Функция Гаусса	$\exp(-z^2 / 2)$
Линейная функция	z

Выбор функции активации в основном определяется спецификой задачи и удобством реализации на ЭВМ. Хотя четких алгоритмов для выбора функции активации нет [10].

Несколько одиночных нейронов могут быть объединены в сеть. Обычно сеть состоит из функциональных слоев, по этому признаку сети разделяются на однослойные и многослойные. Ярким примером многослойной сети является перцептрон (рисунок 3.4).

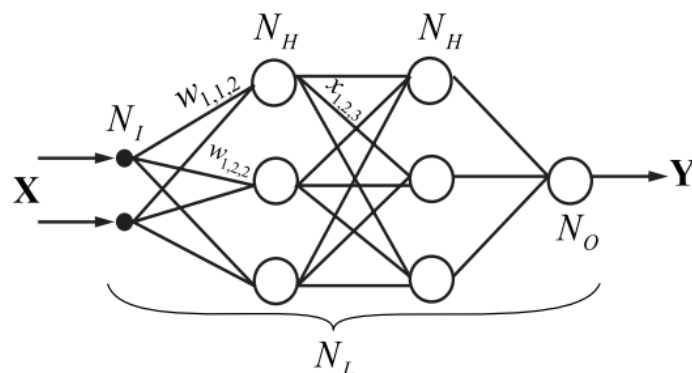


Рисунок 3.4 – Схема многослойного перцептрона

Количество слоев может быть произвольным. Каждый нейрон предыдущего слоя соединен с каждым нейроном последующего. Первый слой выполняет распределение входных сигналов и называется входным, последний, в большинстве случаев состоит из одного нейрона – выходным. Слои между первым и последним называют скрытыми или ассоциативными, число нейронов в слоях может быть произвольным. Обычно во всех скрытых слоях одинаковое количество нейронов. Применение многослойного перцептрона для решения задачи идентификации объекта управления была рассмотрена в [11].

Для настройки синаптических весов сети для решения поставленной задачи, необходимо провести обучение сети. Алгоритмы обучения бывают с учителем, если обучающая выборка составлена на основе известных входных и выходных векторов сети, и без учителя, когда известны только входные вектора. По этому признаку нейронные сети тоже можно классифицировать, например, наиболее известные сети, обучающиеся без учителя это сеть Кохонена и сеть Хопфилда. Их в основном применяют в задачах кластеризации.

Рассмотрим метод обучения для многослойного перцептрона (рисунок 3.5), который получил название метода обратного распространения ошибки.

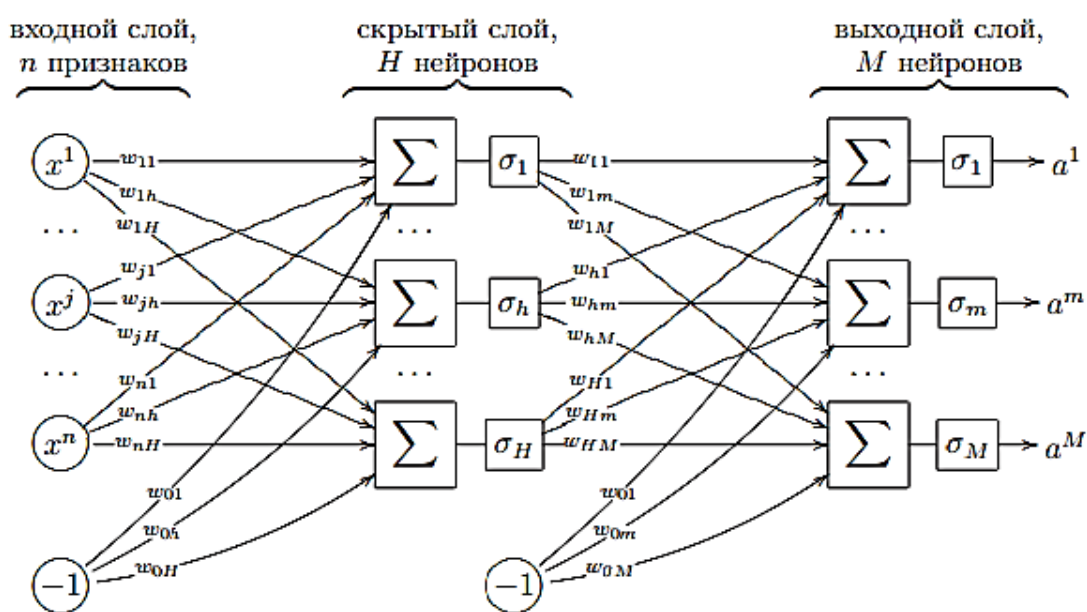


Рисунок 3.5 – Схема многослойной сети с одним скрытым слоем

Предположим, что входной вектор и выходной $X = \mathbb{R}^n$, $Y = \mathbb{R}^M$.

Выходной слой состоим из M нейронов с функциями активации σ_m и выходами a^m , $m = 1, \dots, M$. Скрытый слой состоит из H нейронов с функциями активации σ_h и выходами u^h , $h = 1, \dots, H$. Синаптические веса между h -м нейроном скрытого слоя и m -м нейроном обозначим w_{hm} . Перед скрытым слоем может быть распределительный слой или еще один скрытый с выходами $v^j(x)$, $j = 1, \dots, J$ и синаптическими весами w_{jh} .

Выходные и промежуточные значения сети для x_i вычисляются как

$$a^m(x_i) = \sigma_m\left(\sum_{h=0}^H w_{hm} u^h(x_i)\right); \quad u^h(x_i) = \sigma_h\left(\sum_{j=0}^J w_{jh} v^j(x_i)\right). \quad (3.6)$$

Функционал среднеквадратичной ошибки

$$Q(w) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M (a^m(x_i) - y_i^m)^2. \quad (3.7)$$

На следующем шаге алгоритма, выходные сигналы $a^m(x_i)$ сравниваются с желаемыми данными тренировочной выборки y_i^m . Частные производные Q по выходам нейронов для выходного слоя

$$\frac{dQ(w)}{da^m} = a^m(x_i) - y_i^m = \varepsilon_i^m,$$

и по выходам скрытого слоя

$$\frac{dQ(w)}{du^h} = \sum_{m=1}^M (a^m(x_i) - y_i^m) \sigma'_m w_{hm} = \sum_{m=1}^M \varepsilon_i^m \sigma'_m w_{hm} = \varepsilon_i^h,$$

где σ'_m - производная функции активации.

Идея алгоритма обратного распространения ошибки заключается в распространении сигнала ошибки ε_i^m обратно на все нейроны, чьи выходные сигналы были входящими для последнего нейрона. Весовые коэффициенты w_{hm} , используемые для обратного распространения ошибки, равны тем же коэффициентам, что использовались во время прямого вычисления. Меняется только направление потока данных (сигналы передаются от выхода

ко входу). Процесс выполняется для всех слоёв сети. Далее для корректировки весовых коэффициентов при обучении ИНС с помощью алгоритма обратного распространения, используется метод градиентного спуска [12].

Имея частные производные по a^m и u^h , градиент Q по весам

$$\frac{dQ(w)}{dw_{hm}} = \frac{dQ(w)}{da^m} \frac{\partial a^m}{\partial w_{hm}} = \varepsilon_i^m \sigma'_m u^h, \quad m=1, \dots, M, \quad h=0, \dots, H;$$

$$\frac{dQ(w)}{dw_{jh}} = \frac{dQ(w)}{du^h} \frac{\partial u^h}{\partial w_{jh}} = \varepsilon_i^h \sigma'_m v^j, \quad h=1, \dots, H, \quad j=0, \dots, J.$$

Применяемость нейронных сетей глубока в своей эффективности и области приложения, если следовать основным этапам при решении поставленной задачи.

- 1) Подбор тренировочных выборок для обучения.
- 2) Подготовка и нормализация данных.
- 3) Выбор топологии сети.
- 4) Экспериментальный подбор характеристик сети.
- 5) Экспериментальный подбор параметров обучения.
- 6) Обучение.
- 7) Проверка адекватности обучения.
- 8) Корректировка параметров, окончательное обучение.

3.3 Применение гибридных нейро-нечетких технологий в задачах управления

Современные инженеры сталкиваются с проблемами, описание которых недостаточно полно или для их решения невозможно получить необходимую информацию. Такие ситуации характерны для сложных технических систем. В том числе управление объектами, поведение которых зависит от переменных, которые носят непредсказуемый вероятностный характер.

Для решения подобных задач возможно применение элементов искусственного интеллекта, теоретический фундамент которого составляют противоположные традиционным (четким) компьютерным вычислениям (hard computing) мягкие вычисления (soft computing). Это сложная компьютерная методология, основными компонентами которой являются:

- нечеткая логика;
- нейронные сети.

Совместное использование этих компонентов является базой для гибридных нейро-нечетких систем.

Нечеткой нейронной сетью (ННС) называют четкую нейронную сеть прямого распространения сигнала, которая построена на основе многослойной архитектуры с использованием И-, ИЛИ-нейронов [13]

И-нейроном называется нейрон, в котором умножение веса w на вход x моделируется конормой $S(w, x)$, а сложение нормой $T(w, x)$.

Или-нейроном называется нейрон, в котором умножение веса w на вход x моделируется нормой $T(w, x)$, а сложение весов конормой $S(w, x)$.

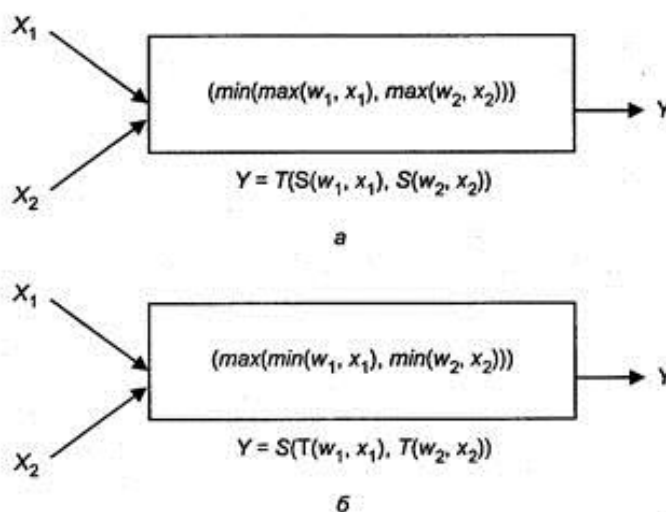


Рисунок 3.6 – Модели нечетких нейронов: а) И-нейрон; б) ИЛИ-нейрон

Для нейронов, изображенных на рисунке 3.6 справедливы следующие зависимости:

$$Y = T(S(w_1, x_1), S(w_2, x_2)), \quad (3.8)$$

$$Y = S(T(w_1, x_1), T(w_2, x_2)), \quad (3.9)$$

В обычном порядке для нечеткого вывода функции принадлежности формируют двумя способами: методом экспертной оценки или на основе статистики. В гибридных системах параметры функций принадлежности настраиваются с помощью нейронных сетей. Для этой цели успешно используется алгоритм обратного распространения ошибки, который позволяет настроить сеть на данные обучающей выборки.

Выделяют следующие отличающиеся по структуре и применению архитектуры гибридных сетей для решения задач управления [13]:

- ANFIS (adaptive network based fuzzy inference system);
- FUN (Fuzzy net);
- GARIC (Generalized approximate reasoning based intelligent control);
- NNDFR (Neuron network driven fuzzy reasoning);
- NNFLC (Neurons network fuzzy logic controller).

Подробно рассмотрим адаптивную ANFIS нейронную сеть с нечетким выводом Сугэно. Такая структура, совмещающая преимущества нейронных сетей и нечеткую логику, была разработана в начале 1990-х годов Янгом [14].

ANFIS представляет собой пятислойную нейронную сеть прямого распространения сигнала. На рисунке 3.7 приведен пример ANFIS сети, где:

- x_1, x_2 - входные переменные (нулевой слой);
- в первом слое для лингвистической оценки на языке нечеткой логики используются термы входных переменных с гауссовой функцией принадлежности (для x_1 - три терма, для x_2 - два терма);
- на втором слое И-нейроны моделируют antecedentes нечетких правил;
- третий слой вычисляет силу или степень выполнения каждого правила;
- нейроны четвертого слоя выполняют операции вычисления значений для функций принадлежности выходного параметра;

- пятый слой, состоящий из одного нейрона, вычисляет выходное значение y как сумму всех входных в него сигналов.

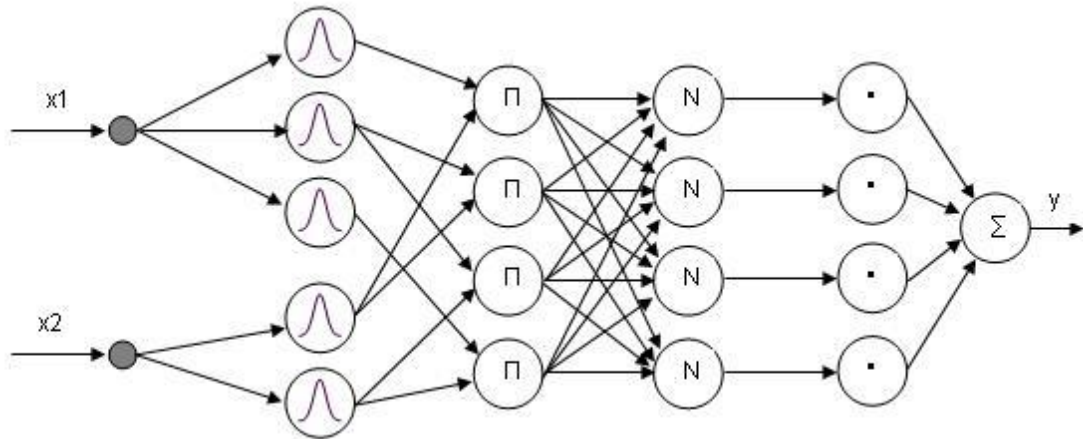


Рисунок 3.7 – Структура ANFIS сети

Пусть ANFIS сетью должно быть аппроксимировано неизвестное отображение

$$Y^k = f(X^k) = f(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k), \quad k = 1, \dots, N. \quad (3.10)$$

При наличии множества обучающих выборок

$$\{(x^1, y^1), \dots, (x^N, y^N)\}. \quad (3.11)$$

Для моделирования нечеткого вывода, применим следующую запись правил

Π_i : если x_1 есть A_{i1} , и x_2 есть A_{i2} и ... и x_n есть A_{in} , то $y = z_i$, $i = 1, \dots, m$, где A_{ij} - нечеткие числа, z_i - вещественные числа. Степень истинности i -го правила вычисляется И-нейронами (второй слой)

$$\alpha_i = \prod_{j=1}^n A_{ij}(x_j^k).$$

Далее для каждого правила определяют частные выходы z_1, \dots, z_m в зависимости от функции принадлежности нечетких множеств, и центроидным методом вычисляется общий выход нечеткой системы

$$o^k = z_0 = \frac{\alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \dots + \alpha_i z_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i}, \quad i = 1, \dots, m.$$

Если ввести функцию ошибки для k -го образа

$$E_k = \frac{1}{2}(o^k - y^k)^2,$$

то это позволяет использовать метод обратного распространения ошибки для подстройки параметров заданных правил. Также применяют комбинацию этого алгоритма с методом наименьших квадратов. С помощью обратного распространения ошибки настраиваются параметры антецедентов правил (функций принадлежности первого слоя), а методом наименьших квадратов подгоняются оптимальные коэффициенты заключений правил (четвертый слой). Процедура настройки продолжается до тех пор, пока ошибка превышает заранее установленное значение.

6 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В этом разделе решается проблема аппаратного воплощения нейро-нечеткого контроллера, рассмотрены несколько возможных вариантов технического обеспечения системы управления ВЭУ. Следует сразу отметить, что готовых продуктов для нейро-нечеткого управления на рынке не найдено.

По своей сути нейро-нечеткий контроллер состоит из устройств, имеющих возможность реализовать:

- нечеткую логику;
- нейросетевой алгоритм.

Далее по отдельности рассмотрено, каким образом можно воплотить эти два алгоритма на физическом уровне.

1) Нечеткий контроллер

Реализовать алгоритм нечеткого вывода на микроконтроллере можно двумя путями:

- аппаратная реализация;
- программно-аппаратная реализация.

В первом случае, разрабатывается специальное устройство для поставленной задачи или же используется промышленный образец: микроконтроллер специального назначения или общего назначения с аппаратной поддержкой нечеткой логики. Среди выпускаемых промышленных контроллеров есть такие, у которых в ядро микросхем встроена аппаратная поддержка базовых нечетких операций (нечеткие команды интегрированы непосредственно в ассемблеры) [24].

Во втором случае, применяется программная реализация на основе микроконтроллеров общего назначения (AVR, PIC, MSP, ARM) для управления электронными устройствами [25]. Для их программирования используют специализированные программные средства разработки.

Плюсы аппаратной реализации – скорость и удобство, но при сравнительно высокой цене. При программной реализации выделяют преимущества: простота использования, доступность, гибкость создаваемых решений. К минусам относят скорость и погрешность вычислений по сравнению с аппаратной реализацией.

2) Нейропроцессор

Аппаратно реализовать нейронную сеть несколько сложнее, чем нечеткую систему, поскольку подобных промышленных образцов микроконтроллеров для решения задач автоматизации нет.

В основном, нейронная сеть создается программным путем на компьютере, например, в среде MATLAB. Отсюда вытекает первый вариант построения нейро-нечеткой сети – применение компьютера непосредственно в контуре управления. В этом случае, для связи компьютера с датчиками и исполнительными органами, в любом случае, придется использовать контроллеры. Одновременно использовать даже малогабаритный одноплатный компьютер и контроллер в системе управления в некоторых ситуациях вообще неприемлемо. Поскольку в первую очередь это сильно повлияет на надежность системы управления из-за возможных зависаний операционной системы компьютера [26].

Другой вариант вытекает из недостатков первого - обойтись без компьютера, использовать только контроллер как для связи с датчиками, так и для логической обработки данных. Такая система будет иметь ряд преимуществ: надежность, более низкая стоимость, меньшие габариты, более простая схема. Контроллер может быть реализован на различной элементной базе, но наибольшее распространение получили устройства с применением цифровых сигнальных процессоров и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [27]. Такие контроллеры называются нейрокомпьютерами (вычислительная система, на основе нейропроцессора,

предназначенная для реализации нейросетевых алгоритмов в реальном масштабе времени).

Таким образом, есть два пути реализации нейро-нечеткого алгоритма:

- создание уникального устройства на элементной базе, имеющей возможность реализации нейросети (нейропроцессор) совместно с микроконтроллером нечеткой логики на одной электронной плате [24];
- использовать программируемый логический контроллер общего назначения, имеющий «нечеткую» библиотеку, с отдельным контроллером, на базе нейрокомпьютерного модуля.

На рисунке 6.1 представлен пример элементной базы для нейро-нечеткого контроллера по первому пути реализации.

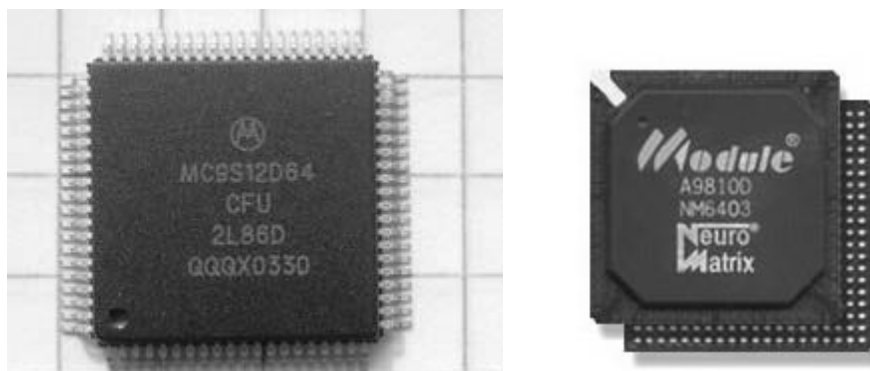


Рисунок 6.1 – Внешний вид микроконтроллера «Motorola» и нейропроцессор «Модуль Л1879ВМ1»

Все же второй вариант более привлекателен с точки зрения простоты, реализации, синтеза и настройки системы. Необходимо выбрать программируемый логический контроллер с поддержкой нечеткой логики и нейрокомпьютер, или другими словами аппаратную платформу с нейропроцессором.

В [28] предложен метод построения нейронной сети на базе платы микроконтроллера Arduino Due. Плата имеет два порта MicroUSB, один из которых можно использовать как коммуникационный для связи с нечетким

контроллером по протоколу CAN (Devicenet), а также для программирования. Созданную в среде MATLAB нейронную сеть можно выгрузить из языка MATLAB в виде программного кода на языке C и C++, который является платформонезависимым и может быть использован как исходный код для программирования. Вычислительные возможности Arduino Due можно повысить, подключая к ней дополнительные модули-расширения. Технические характеристики приведены в таблице 6.1.

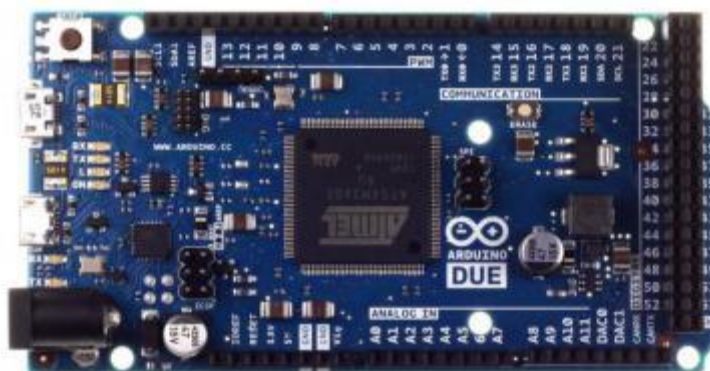


Рисунок 6.2 – Внешний вид платформы Arduino Due

Таблица 6.1 - Технические характеристики Arduino Due

Микроконтроллер	AT91SAM3X8E (ARM Cortex-M3 32-бит)
Рабочее напряжение	3,3 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12 В
Входное напряжение (предельное)	6-20 В
Цифровые Входы/Выходы+6	54 (на 12 из которых реализуется выход ШИМ)
Аналоговые входы	12
Аналоговые выходы	2 (ЦАП)
Общий выходной постоянный ток на всех входах/выходах	50 мА
Постоянный ток через вывод 3,3 В	800 мА
Постоянный ток через вывод 5 В	800 мА
Флеш-память	512 КБ
ОЗУ	96 КБ (два банка: 64 КБ и 32 КБ)
Тактовая частота	84 МГц

Подробное описание функционирования Arduino Due в качестве нейронной сети приведено в [28].

Альтернативным вариантом может быть готовая платформа Braincard или NeuroStack на базе нейронного процессора (-ов) CM1K, содержащего

сеть из 1024 нейронов (память одного нейрона 256 байт). Технические характеристики плат приведены в таблице 6.2.



Рисунок 6.3 – Внешний вид процессора CM1K и платформы NeuroStack

Таблица 6.2 - Характеристики платы Braincard и NeuroStack

	Braincard	NeuroStack
Число процессоров CM1K	1	4
Число дополнительных процессоров CM1K / дополнительных модулей	до 9	до 64 / до 16
Вспомогательный вычислительный модуль:	Конфигурируемая пользователем Xilinx Spartan 6 FPGA	Конфигурируемая пользователем Lattice XP2 FPGA (программирование через JTAG, USB, SPI)
Память	16 Мбайт SDRAM	2 Мбайт MRAM
Разъемы расширения	Коннектор подключения модулей Raspberry Pi, посадочное место для разъема подключения модулей Arduino, коннектор для подключения процессора Intel Edison	
Интерфейсы	USB 2.0, Micro SD, HDMI	USB, JTAG, SPI
Питание	5 В от питающего разъема (power jack) или от модулей Arduino и Raspberry Pi	

Если выбирать из предложенных решений, с учетом того, что на всех платформах можно реализовать разработанный алгоритм, то Arduino Due значительно дешевле Braincard и тем более NeuroStack. Но Braincard и NeuroStack предпочтительнее по техническим параметрам и они являются уже готовым коммерческим продуктом, использующим нейросетевые технологии. Исследователи отмечают, что создать действующую нейросеть

оказывается делом непростым. Поэтому для более эффективного процесса программирования, отладки, лучше использовать специально предназначенные для нейросетей устройства. Тем более платы Braincard и NeuroStack успешно применяются в областях машинного зрения, автомобильных систем безопасности.

Программируемый логический контроллер с поддержкой нечеткой логики можно выбрать из каталогов производителей ПЛК. При выборе, внимание стоит уделить поддержке специальных функций - Fuzzy Logic, или же возможности программирования под нечеткую логику. Число входов/выходов требующихся для разработанной системы невелико: контроллера с 16 (12) дискретными входами (выходами), 8 (4) аналоговыми входами (выходами) будет достаточно. С учетом того, что обмен данными между программами нейропроцессора и нечеткого контроллера будет осуществляться через стандартный, поддерживаемый обоими протокол связи. Типовыми решениями могут быть контроллеры:

- Simens Simatic S7-200;
- Schneider Electric Modicon Micro;
- OMRON Sysmac C200H;
- ОВЕН ПЛК160.



Рисунок 6.4 – Внешний вид ПЛК слева направо: Simatic S7-200, Modicon Micro, OMRON C200H

В зависимости от конструктивного исполнения первые три контроллера – модульные. ОВЕН ПЛК160 – представитель моноблочного конструктива. Все ПЛК имеют в оболочке программирования на ПК пользовательский интерфейс для конфигурирования нечеткой логики.

Надежным решением для системы нейро-нечеткого управления ВЭУ было бы использование платформы NeuroStack в сочетании с любым из предложенных модульных ПЛК. При таком решении производительность и скорость работы системы будет наилучшей.

Самый бюджетный вариант исполнения будет сочетание Arduino Due с ОВЕН ПЛК160.

Следует отметить, что процесс настройки их на совместную работу, как нейро-нечеткой сети, потребует проведения дополнительных исследований и экспериментов на реальной аппаратуре.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4Д	Закамалдину Андрею Андреевичу

Институт	Энергетический	Кафедра	АТП
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Материальные затраты для реализации технической составляющей проекта зависят от цен, установленных заводами изготовителями. Затраты, связанные с оплатой труда исполнителей проекта, определяются в зависимости от тарифной ставки и коэффициентов.
2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные страховые фонды определяются согласно Федеральному закону от 24.07.2009 №212-ФЗ.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	SWOT-анализ системы управления.
2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Определение трудоемкости выполнения ВКР и координирование работ. Расчет заработной платы исполнителям.
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Расчет сметы проекта.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Диаграмма FAST
5. Матрица SWOT
6. График проведения и бюджет НТИ
7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
8. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Попова С. Н.	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Д	Закамалдин А.А.		

7 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью раздела является анализ перспективности проведенных в магистерской диссертации проектных работ, исследование всех возможных альтернативных вариантов реализации проектируемой задачи, выявление сильных и слабых сторон проекта, а также определение финансовых затрат для реализации проекта и разработку.

Достижение цели обеспечивается решением следующих задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения теоретических и экспериментально-практических исследований в рамках магистерской диссертации;
- планирование технико-конструкторских работ;
- определение ресурсной и экономической эффективности технического проекта.

7.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности технического проекта с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Коммерческая привлекательность проведенных в магистерской диссертации исследований определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет технического проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

7.1.1 Потенциальные потребители

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. [29]

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

У ветроэнергетики очень большое будущее, о чем говорит показатель ежегодного прироста установленных мощностей в мире, который составляет 25%. Ветроэнергетика в перспективе сможет конкурировать с основными источниками энергии, такие как нефть и газ, поэтому с каждым годом рынок ветроэнергетических установок расширяется. Это связано с тем, что внедряются новейшие технологии позволяющие использовать энергию ветра максимально эффективно. Страны Европейского союза, которые испытывают нехватку собственных запасов органического топлива, давно сделали уклон на развитие ветроэнергетики. Поэтому спрос с их стороны с каждым годом растет, в особенности на ВЭУ большой и средней мощности. Отечественная энергетика в этом плане сильно отстает (имеет лишь 0,8% мощности, вырабатываемой ветрогенераторами, по сравнению с Европой – 16%) и в основном перспективно использование ветрогенераторов малой мощности.

Система управления, разработанная в ходе исследований, имеет направленность на ветроустановки большой и средней мощности. Создание таких ВЭУ требует огромных капитальных затрат (порядка 1000-2000 долларов за 1 кВт установленной мощности), от которых стоимость системы управления составляет всего 3-5% [30]. Заказчиком на подобные станции выступают в основном госкорпорации.

Таким образом, сегментировать будущий рынок услуг можно по одному основному критерию: размер компании-заказчика.

Размер компании-заказчика: крупные, средние и мелкие. От размера компании зависит бюджет, выделяемый на капитальные затраты. Поскольку при внедрении системы управления необходимо учитывать сроки окупаемости капитальных затрат, то для мелких и средних компаний данная разработка будет менее предпочтительна. Для крупных компаний заказчиков

данная разработка может составить интерес по отношению к традиционным аналогам, поэтому именно на них должен быть ориентирован будущий рынок.

7.1.2 SWOT – анализ системы управления

SWOT – анализ предназначен для выявления сильных, слабых сторон проекта, а также возможностей создаваемого проекта и его угроз. Анализ проводится в два этапа: на первом этапе описываются сильные и слабые стороны разрабатываемой технологии, выявляются возможности и угрозы при реализации проекта; на втором этапе анализа строятся интерактивные матрицы для оценки вариантов стратегического выбора.

Сильные и слабые стороны проекта, а также возможности и угрозы реализации представлены в таблице 7.1. При составлении таблицы использованы следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы.

Таблица 7.1 - Матрица SWOT системы управления

	Сильные стороны проекта:	Слабые стороны проекта:
	С1. Высокая экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Повышение безопасности производства. С4. Уменьшение затрат на ремонт оборудования. С5. Надежность в эксплуатации.	Сл1. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ. Сл2. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца. Сл3. Отсутствие прототипа научной разработки.
Возможности (В), угрозы (У)	1	2
В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ. В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт.		

Продолжение таблицы 7.1

1	2	3
В3. Снижение затрат на таможенные пошлины за счет малого количества иностранных компонентов. В4. Использование инфраструктуры ОЭЗ ТВТ Томск.		
У1. Отсутствие спроса на технологии производства. У2. Ограничения на экспорт технологии. У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции. У4. Отсутствие финансового обеспечения со стороны государства.		

После составления матрицы необходимо составить интерактивные матрицы, для выявления сильных и слабых сторон разработанной системы.

При построении интерактивных матриц используются следующие обозначения:

«+» – сильное соответствие;

«-» – слабое соответствие;

«0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 7.2 – Интерактивная матрица возможностей

Возможности проекта	Сильные стороны проекта					
		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	+	-	+	-
	B2	+	+	+	-	0
	B3	-	-	-	-	+
	B4	+	-	-	0	0
	Слабые стороны проекта					
		Сл1	Сл2	Сл3		
	B1	+	+	-		
	B2	-	-	-		
	B3	-	-	-		
	B4	-	+	+		

Таблица 7.3 – Интерактивная матрица угроз

Угрозы	Сильные стороны проекта					
		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	-	-	-	-	-
	У2	-	-	0	-	-
	У3	+	-	0	-	+
	У4	-	-	+	-	+
	Слабые стороны проекта					
		Сл1		Сл2		Сл3
	У1	+		-		0
	У2	+		-		-
	У3	-		-		-
	У4	+		+		+

По интерактивным матрицам, представленным в таблицах 7.2 и 7.3 видно, что наиболее коррелирующими сильными сторонами и возможностями являются: В1С1С2С4, В2С1С2С3.

Наиболее часто коррелирующие слабые стороны и возможности: В2Сл1Сл2, В4Сл2Сл3.

Сильно коррелирующие сильные стороны и угрозы: У4С3С5.

Сильно коррелирующие слабые стороны и угрозы: У4Сл1Сл2Сл3.

Полученные результаты анализа заносятся в таблицу 7.4, для наглядной демонстрации возможных корреляционных вариантов.

Таблица 7.4 – Итоговая матрица SWOT-анализа АСР

Возможности (В), угрозы (У)	Сильные стороны проекта:	Слабые стороны проекта:
	С1. Высокая экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Повышение безопасности производства. С4. Уменьшение затрат на ремонт оборудования. С5. Надежность в эксплуатации.	Сл1. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ. Сл2. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца. Сл3. Отсутствие прототипа научной разработки.
1	2	3
В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ. В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт.	В1С1С2С4; В2С1С2С3; В3С5; В4С1.	В1Сл1 Сл2; В4Сл2Сл3.

Продолжение таблицы 7.4

1	2	3
В3. Снижение затрат на таможенные пошлины за счет малого количества иностранных компонентов. В4. Использование инфраструктуры ОЭЗ ТВТ Томск.		
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на технологии производства. У2. Ограничения на экспорт технологии. У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции. У4. Отсутствие финансового обеспечения со стороны государства.	У3С1С5; У4С3С5.	У1Сл1; У2Сл1; У4Сл1Сл2Сл3.

По полученным результатам можно сделать вывод, что разрабатываемая автоматическая система регулирования является перспективным проектом, о чем свидетельствует большое количество сильных сторон и маловероятные угрозы.

7.2 Планирование магистерской диссертации

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение работ в рамках магистерской диссертации;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения магистерской диссертации.

7.2.1 Определение работ и участников в рамках магистерской диссертации

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения магистерской диссертации, провести распределение исполнителей по видам работ (таблица 7.5).

Таблица 7.5 – Перечень работ и распределение исполнителей

Наименование работ	Исполнители	
	Должность	Количество
1. Выбор и утверждение темы диссертации	Руководитель	1
	Студент	
2. Создание обзорной главы диссертации	Студент	1
3. Исследование современных методов анализа и синтеза систем автоматического управления	Студент	1
4. Определение математической модели объекта управления. Моделирование существующих систем управления и анализ полученных результатов.	Студент	1
		1
5. Написание статей	Студент	1
6. Синтез системы управления ветроэнергетической установкой на основе нейро-сетевых технологий и нечетких множеств	Студент	1
7. Моделирование и анализ полученной системы управления ветроэнергетической установкой	Студент	1
8. Разработка раздела финансовый менеджмент	Студент	1
9. Разработка раздела социальная ответственность	Студент	1
10. Подготовка текста диссертации. Подготовка демонстрационных материалов и докладов для защиты	Студент	1
11. Проверка составленной документации и разработанных схем	Руководитель	1
12. Защита проекта	Студент	1
13. Реализация проекта на объекте	Специалист по наладке	1

7.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения магистерской диссертации оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения

ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Результаты расчетов ожидаемой трудоемкости представлены в таблице 7.6.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы.

$$T_{p_i} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где T_{p_i} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Рассчитанные показатели продолжительности в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Календарная продолжительность работ

Название работы	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ожi}$ чел-дни			
1. Выбор и утверждение темы диссертации	40	46	42,4	Руководитель Студент	52	61
2. Создание обзорной главы диссертации	18	23	20	Студент	26	30
3. Исследование современных методов анализа и синтеза САУ	30	38	33,2	Студент	53	62
4. Определение математической модели объекта управления. Моделирование существующих систем управления и анализ полученных результатов.	35	42	37,8	Студент	50	59
5. Написание статей	30	40	34	Студент	52	61
6. Синтез системы управления ветроэнергетической установкой на основе нейро-сетевых технологий и нечетких множеств	80	100	88	Студент	104	122
7. Моделирование и анализ полученной системы управления ветроэнергетической установкой	80	85	77,8	Студент	78	91
8. Разработка раздела финансовый менеджмент	10	15	12	Студент	13	15
9. Разработка раздела соц. ответственность	10	15	12	Студент	13	15
10. Подготовка текста диссертации. Подготовка демонстрационных материалов и доклада для защиты	18	23	20	Студент	26	31
11. Проверка составленной документации и разработанных схем	3	4	3,4	Руководитель	5	5
12. Защита проекта	1	1	1	Студент	1	1
13. Реализация проекта на объекте	3	7	4,6	Специалист по наладке	5	7

7.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Удобным и наглядным является ленточный график проведения технических работ в форме диаграммы Ганта [31].

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ .

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} ,$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;
 T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;
 $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,478 ,$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;
 $T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;
 $T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках магистерской диссертации проекта на основе таблице 6 с разбивкой по месяцам. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Ленточный график для данной магистерской диссертации представлен в таблице 7.7.

Таблица 7.7 - Календарный план-график проведения ВКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																		
				2014				2015								2016						
				сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	Май	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
1	Выбор и утверждение темы диссертации	Руководитель	61	■																		
		Студент	61	■																		
2	Создание обзорной главы диссертации	Студент	30			■																
3	Исследование современных методов анализа и синтеза САУ	Студент	62				■	■														
4	Определение математической модели объекта управления. Моделирование существующих систем управления и анализ полученных результатов.	Студент	59						■	■												
5	Написание статей	Студент	61								■	■										
6	Синтез системы управления ВЭУ на основе нейро-сетевых технологий и нечетких множеств	Студент	122										■	■	■	■						

Продолжение таблицы 7.7

[illegible]

Обозначения:



- Руководитель



- Студент



- Специалист по наладке

Исходя из данной диаграммы, можно сделать вывод, что общая продолжительность работы над проектом составляет 560 календарных дней. Основной объем работы выполняется студентом, а самой продолжительной работой над проектом является «синтез системы управления ВЭУ на основе нейро-сетевых технологий и нечетких множеств», которая занимает 122 календарных дня.

7.3 Затраты на разработку технического проекта

При планировании сметы проекта должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования сметы используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты проекта;
- полная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

7.3.1 Материальные затраты на проектные работы

В данной части работы стоит цель провести анализ стоимости приборов и оборудования, включаемых в систему регулирования.

В таблице 7.8 приводятся основные компоненты системы адаптивного управления ветроэнергетической установкой, а именно контроллер, поддерживающий базовые нечеткие операции, процессор, позволяющий реализовать нейронную сеть (нейропроцессор) и платформа нейроконтроллера (нейроплата).

Каждое исполнение включает в себя определенный набор средств автоматизации, приведенных в таблице 7.8.

Таблица 7.8 – Наименование приборов, включенных в каждое исполнение

Прибор	Исполнение 1	Исполнение 2	Исполнение 3
Нечеткий контроллер	Simens Simatic S7-200	ОВЕН ПЛК160	Modicon Micro
Нейропроцессор	Модуль Л1879ВМ6 (NM6407)	NeuroMem CM1K	Analog devices ADSP-2116
Плата нейроконтроллера	Arduino Due	Braincard (NeuroStack)	Analog devices ADZS-CM419F-EZLITE

Стоимость каждого комплектующего определяется по формуле:

$$C = K \cdot Ц,$$

где C – стоимость комплектующего, руб.;

K – количество, шт.;

$Ц$ – цена комплектующего, руб.

Сумма расходов на материалы и комплектующие изделия приведены в таблице 7.9.

Таблица 7.9 - Стоимость оборудования

Наименование	Количество			Цена за ед., руб.		
	Исп. 1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Нечеткий контроллер	1	1	1	24223	23168	35735
Нейропроцессор	1	1	1	1350	6623	2956
Платформа нейроконтроллера	1	1	1	1990	33114	26734
ИТОГО, руб				27563	62905	65425

Из технических соображений выбираем комплектацию приборов второго исполнения, которая лучше всего подходит по параметрам для разрабатываемой АСР. Таким образом, первоначальная стоимость с учетом затрат на доставку и монтаж составляет: $C_m = 62905 \cdot 1,15 = 72,3$ тыс. руб.

7.3.2 Полная заработная плата исполнителей технического проекта

В данный раздел входит анализ основной и дополнительной заработной платы всех исполнителей, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Полная заработная плата вычисляется как:

$$З_{\text{зп}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}},$$

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$З_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-15 % от $З_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата исполнителя (дипломника, техника) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых техническим работником, раб. дн.;

$З_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{тс}} + З_{\text{допл}} + З_{\text{р.к.}}}{F_{\text{д}}},$$

где $F_{\text{д}}$ – количество рабочих дней в месяце (26 при 6-дневной рабочей неделе, 22 при 5-дневной рабочей неделе), раб. дн.;

$З_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$З_{\text{допл}}$ – доплаты и надбавки, руб.;

$З_{\text{р.к.}}$ – районная доплата, руб.

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 6.10.

Таблица 7.10 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	$Z_{допл}$, руб.	$Z_{р.к.}$, руб.	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	23265	3000	7639	33904	1304	57	74328
Студент	8022	-	2406	10428	401	477	191325
Специалист по наладке	30000	-	9000	39000	1500	5	7500
Итого $Z_{осн}$, руб.							273153

Дополнительная заработная плата составляет 12 – 15% от основной. Расчет дополнительной и полной заработной платы представлен в таблице 7.11.

Таблица 7.11 – Расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	$k_{доп}$	$Z_{осн}$, руб.	$Z_{доп}$, руб.	$Z_{зп}$, руб.
Руководитель	0,15	74328	11149	85477
Дипломник	0,12	191325	22959	214284
Специалист по наладке	0,12	7500	900	8400
Итого $Z_{осн}$, руб.		273153	35008	308161

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор (см. «Положение об оплате труда», приведенное на интернет-странице Планово-финансового отдела ТПУ).

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

7.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда и медицинского страхования от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}),$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2016 г. в соответствии с Федеральным законом от 28.11.2015 № 347-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%.

$$З_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot (273,1 + 35) = 92,4 \text{ тыс. руб.}$$

7.3.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{\text{нр}},$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Прочие расходы определяются как 1% от суммы материальных затрат, затрат на оплату труда и социальных отчислений:

$$З_{\text{пр}} = 0,01 \cdot (72,3 + 308,2 + 92,4) = 4,7 \text{ тыс. руб.}$$

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

$$З_{\text{накл}} = (72,3 + 308,2 + 92,4 + 4,7) \cdot 0,16 = 76,4 \text{ тыс. руб.}$$

7.3.5 Смета затрат технического проекта

Смета затрат на технический проект приведена в таблице 7.12.

Таблица 7.12 – Расчет сметы затрат технического проекта

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат, %
Материальные затраты	72,3	13,1
Затраты на заработные платы исполнителей проекта	308,2	55,6
Отчисления во внебюджетные фонды	92,4	16,7
Прочие расходы	4,7	0,8
Накладные расходы	76,4	13,8
Себестоимость проекта	554	100

Таким образом, по всему разделу финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение можно подвести следующие итоги:

- SWOT-анализ показывает сильные и слабые стороны проекта, проведена оценка надежности и возможностей проекта. Установлено, что технический проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих надежность в эксплуатации и экономичность технологических процессов;
- при планировании технико-конструкторских работ разработан график занятости для трех исполнителей: руководитель, студент, специалист по наладке. Составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Общая продолжительность работ над проектом составила 560 календарных дней;
- расчет сметы затрат показал, что для реализации проекта требуется 554 тыс. руб. Основная статья расходов - расходы на заработные платы, которая составила 55,6% всех затрат.